

Tartu Ülikool  
Loodus- ja täppisteaduste valdkond  
Ökoloogia ja Maateaduste instituut  
Geograafia osakond

Bakalaureusetöö loodusgeograafias (12 EAP)

**Tõraverre metsaseireala mullahingamine ja peenjuurte biomass**  
**Inge-Marit Tigas**

Juhendaja: Kaie Kriiska

Kaitsmisele lubatud:

Juhendaja:

Osakonna juhataja:

Tartu 2018

## **Tõravere metsaseireala mullahingamine ja peenjuurte biomass**

### **Infoleht**

Mullahingamine on süsinikuringe üks suurimaid vooge ning seetõttu mõjutab see süsihappegaasi kogust atmosfääris. Globaalse temperatuuritõusuga võib aga üha enam süsinikku hakata mullast eralduma, põhjustades veel suurema süsihappegaasi kontsentratsiooni. Läbi peenjuurte seotakse süsinikku mulda, suurendades mulla süsinikuvaru. Antud töös uuriti mullahingamist Tõravere kuusikus Tartumaal ning leiti, et mullahingamine katsealal teistest kuusikutes tehtud töödest oluliselt ei erinenud. Mullahingamine oli seotud temperatuuriga, sest temperatuur on külmates regioonides määravaks faktoriks juurte ja taimede kasvul ning põhjustab vegetatsiooniperioodi, kuid olulisi seoseid teiste faktoritega ei esinenud.

**Märksõnad:** mullahingamine, heterotroofne hingamine, mets, Tõravere, peenjuured, trenching

CERCS: P510- füüsiline geograafia, geomorfoloogia, mullateadus, kartograafia, klimatoloogia

## **Soil respiration and fine root biomass in Tõravere forest monitoring site**

### **Abstract**

Soil respiration is one of the largest fluxes in global carbon cycle, affecting carbon dioxide amount in atmosphere. Global temperature rise might increase respiration, resulting in even bigger carbon dioxide concentration. Fine roots are critical factor, through which carbon is inserted to soil. In this thesis, soil respiration was inspected and found that soil respiration showed no difference compared to other similar studies. Soil respiration was significantly correlated with soil temperature, because the temperature in colder regions is a determining factor in root and plant growth and therefore determined the vegetation period. No significant correlations between soil respiration and other environmental factors were not found.

**Key words:** soil respiration, heterotrophic respiration, Tõravere, forest, fine root, trenching

CERCS: P510- Physical geography, geomorphology, pedology, cartography, climatology

## Sisukord

<b>1</b>	<b>Sissejuhatus .....</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Mullahingamine metsaökosüsteemides .....</b>	<b>7</b>
2.1	Autotroofne mullahingamine.....	9
2.2	Heterotroofne mullahingamine .....	9
2.3	Peenjuured .....	10
<b>3</b>	<b>Katseala kirjeldus .....</b>	<b>11</b>
<b>4</b>	<b>Materjalid ja metoodika.....</b>	<b>13</b>
4.1	Mullahingamise mõõtmine.....	13
4.2	Peenjuurte biomassi mõõtmine .....	14
4.3	Mullatemperatuuri ja -niiskuse mõõtmine ja õhutemperatuuri andmed .....	14
4.4	Andmete analüüs .....	15
<b>5</b>	<b>Tulemused.....</b>	<b>16</b>
5.1	Mullaparametrid.....	16
5.2	Mullahingamine .....	17
5.3	Trenching metoodika ajaline mõju heterotroofsele mullahingamisele.....	20
5.4	Peenjuurte biomass .....	21
<b>6</b>	<b>Arutelu .....</b>	<b>22</b>
	<b>Kokkuvõte.....</b>	<b>24</b>
	<b>Summary.....</b>	<b>25</b>
	<b>Tänuavaldused .....</b>	<b>26</b>
	<b>Kirjanduse loetelu .....</b>	<b>27</b>

## Kasutatud lühendid

Rs - *soil respiration*, kogu mullahingamine (heterotroofne + autotroofne hingamine)

Ra - *autotrophic respiration*, juurte kasvuga seotud ehk autotroofne mullahingamine

Rh - *heterotrophic respiration*, mulla orgaanilise aine lagunemisega seotud mikroobne hingamine ehk heterotroofne mullahingamine

SOM - *soil organic matter*, mulla orgaaniline aine

WRB - *World Reference Base for Soil Resources*, maailma muldade klassifitseerimise süsteem

SOC - *soil organic carbon*, mulla orgaaniline süsinik

# 1 Sissejuhatus

Mullahingamine on globaalses süsinikuringes fotosünteesi järel suuruselt teine voog (Schlesinger ja Andrews, 2000), mille kaudu eraldub igal aastal atmosfääri hinnanguliselt 78–95 Gt süsinikku (C) (Bond-Lamberty ja Thomson, 2010; Wang *et al.*, 2017). Mullahingamisest tekkiv süsiniku emissioon on umbes 10 korda suurem, kui fossiilkütuste põletamisel ja tsemenditööstusest kokku eralduv süsiniku hulk (IPCC, 2013). Mullahingamise roll süsinikuringes on oluline, mistõttu on viimastel aastakümnetel ka selle uurimine järjest süvenenud.

Globaalselt on mulda salvestunud rohkem süsinikku kui atmosfääris ja taimedes kokku (Schlesinger ja Bernhardt, 2013), seega võivad juba väikesed muutused mullahingamises mõjutada atmosfääri süsihappegaasi (CO<sub>2</sub>) kontsentratsiooni tasakaalu (Luo ja Zhou, 2006).

CO<sub>2</sub> koguse suurenemine atmosfääris põhjustab õhutemperatuuri tõusu ning muutuseid sademete režiimis (Alcamo *et al.*, 2007), mis viib ka mullahingamisvoogude muutusteni. Arvatavasti suurendab õhutemperatuuri tõus mullahingamist intensiivistunud mulla orgaanilise aine (SOM) lagunemise tõttu, mis omakorda lisab CO<sub>2</sub>-te atmosfääri (Kirschbaum 1995).

Kõikidest metsaökosüsteemidest on kogu süsinikuvaru suurim troopilistes metsades, kuid mulla süsinikusisaldus on suurim boreaalsetes metsades (borealse metsa mullas 39 kg C m<sup>-2</sup>, troopikas 16,2 kg C m<sup>-2</sup>) (Grace, 2001). Arvatakse, et globaalne soojenemine mõjutab mullahingamist kõige rohkem just külmates, boreaalsetes regioonides (Goulden *et al.*, 1998). Eesti asub borealse vöötme lõunapiiril, mistõttu on kliimamuutustest tingitud mullahingamise ja seega kogu süsinikubilansi muutused ka meil aktuaalsed.

Metsad akumulatsioonivad maa-aluse süsiniku mulla orgaanilisse ainesse ja juurte biomassi, mis mõlemad mõjutavad mullahingamist (Campbell ja Law, 2005). Maa-aluses biomassis olev süsinik on küll peamiselt talletatud jämedates juurtes, kuid liigub sinna peenjuurte kaudu, seepärast mõjutavad muutused peenjuurte biomassis ja käibekiiruses oluliselt kogu metsamulla süsinikuringet (Lukac ja Godbold, 2011).

Antud bakalaureusetöö koosneb kahest osast. Esimene osa annab teoreetilise ülevaate mullahingamise olemusest ja seda mõjutavatest keskkonnateguritest. Töö teine osa hõlmab läbiviidud empiiriliste mullahingamise ja peenjuurte biomassi mõõtmise kirjeldust, tulemusi ja analüüsi.

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärgid olid:

- 1) mõõta Tõravere metsaseireala seshoonset mullahingamist, eristades seejuures koguhingamist ja heterotroofset mullahingamist;
- 2) uurida *trenching* metoodika ajalist mõju heterotroofsele mullahingamisele;
- 3) määrata uurimisala peapuuliigi ehk kuuse ja rohhtaime peenjuurte biomass.

## 2 Mullahingamine metsaökosüsteemides

Metsaökosüsteemidel on oluline roll süsinikuringes. Metsa süsinikubilanss on mõjutatud fotosünteesist, puude kasvust, süsiniku akumulatsioonist puitsesse biomassi ja mulda ning elus biomassi hingamisest, puude suremisest, varise ja mulla orgaanilise aine lagunemisest tingitud süsiniku vabanemisest atmosfääri. Fotosünteesiga seotud ja hingamisega eralduva CO<sub>2</sub> vahelisest tasakaalust sõltub, kas metsaökosüsteem on tervikuna süsiniku salvestaja või allikas (Malhi *et al.*, 1999). Igal aastal neelavad taimed atmosfäärist fotosünteesi kaudu umbes 120 Pg süsinikku ning samapalju süsinikku eraldub ka ökosüsteemi hingamisest (Luo ja Zhou, 2006). Dixon *et al.* (1994) on hinnanud, et metsaökosüsteemide süsinikuvaru on umbes 1150 Gt, millest boreaalsetes metsades on 395 Gt (Grace, 2001), kus viimases moodustab mullahingamine kuni 80% kogu ökosüsteemi hingamisest (Black *et al.*, 2005).

Mullahingamiseks (Rs) nimetatakse erinevate ökosüsteemi protsesside (juurte kasvuhingamise, varise ja mulla orgaanilise aine lagunemise ning mulla fauna hingamise) summat, mille käigus vabaneb CO<sub>2</sub> (Luo ja Zhou, 2006) ning mille kaudu vabaneb süsinik mullast tagasi atmosfääri (Buchmann, 2000).

Mullahingamist iseloomustab ajaline varieeruvus- ööpäevane, nädalane, aastaajaline (sesoonne) ja aastatevaheline. Sesonne varieeruvus on jälgitav peaaegu kõikides ökosüsteemides, sõltudes ökosüsteemi tüübist ja kliimast. Mullahingamine on kõrgeim suvel ning madalaim talvel, olles peamiselt mõjutatud temperatuurist, niiskusest, fotosünteesi produktsioonist ja nende kõigi tegurite omavahelisest koosmõjust. Reeglina on suvel hingamist limiteerivaks faktoriks niiskus ja talvel temperatuur (Luo ja Zhou, 2006).

Mullahingamine jagatakse juure- ehk autotroofseks ja mikroobseks ehk heterotroofseks hingamiseks (Luo ja Zhou, 2006). Süsinikuringe modelleerimisel on oluline eristada auto- ja heterotroofset hingamist, sest vaid heterotroofide poolt omastatud orgaaniline materjal akumulereb mulda süsinikuna, seevastu autotroofselt hingamisel eraldub süsinik kohe mullast tagasi atmosfääri (Ryan ja Law, 2005).

Mullahingamist mõjutavad erinevad biotilised ja abiotilised keskkonnafaktorid, millest temperatuur ja niiskus on ühed kõige olulisemad tegurid (Lloyd ja Taylor, 1994; Kirchbaum, 1995; Rustad *et al.*, 2001; Luo ja Zhou, 2006). Temperatuur mõjutab mulla orgaanilise aine lagunemise kiirust (Eliasson *et al.*, 2005), vegetatsiooniperioodi pikkust (Myneni *et al.*, 1997),

mulla niiskusesisaldust (Allison *et al.*, 2008), lämmastiku mineralisatsiooni ja kättesaadavust (Rustad *et al.*, 2001) ja kõigi nende protsesside kaudu mullahingamist.

Paljud uurimistulemused temperatuuri ja mullahingamise seose kohta on vastukäivad. Mullahingamise ja temperatuuri tagasiside võib olla näiteks negatiivne, kui kõrgem temperatuur inhibeerib mullahingamise aktiivsust (Bond-Lamberty ja Thomson, 2010) ning taimede poolt mulda viidud süsinik ületab lagunemisel eralduvat süsiniku hulka (Davidson ja Janssen, 2006). Kõrgem temperatuur võib vähendada mulla niiskusesisaldust, mis pärsib juurte ja mikroobide kasvu (Peterjohn *et al.*, 1994). Valdavalt on leitud aga temperatuuri ja mullahingamise vahel positiivset tagasisidet, kui kõrgem temperatuur tingib kiirema orgaanika lagunemine ning maa-alla salvestunud süsinik eraldub atmosfääri (Cox *et al.*, 2000). Näiteks leidsid Wei *et al.* (2010), et aastase keskmise temperatuuri tõus 1 kraadi võrra suurendab mullahingamise voogu 24.6 g C m<sup>-2</sup> aastas. Üldiselt on temperatuuri tõusu suhtes kõige tundlikumad külmade regioonide metsaökosüsteemid, sest boreaalsete metsade mulla C varu on suurim (Goulden *et al.*, 1998; Grace, 2001).

Mullahingamise ja temperatuuri vahelist seost kirjeldatakse sageli eksponentsiaalse võrrandiga, millest tuletatakse mullahingamise temperatuuritundlikkust iseloomustav koefitsienti  $Q_{10}$  (hingamise voo muutus 10°C temperatuuri tõusu kohta) (Kirchbaum, 1995).  $Q_{10}$  väärtused varieeruvad suurtes piirides (1 kuni 12 ja enam) (Hamdi *et al.*, 2013). Euroopa ja Põhja-Ameerika metsades varieerub  $Q_{10}$  väärtus piirides 2.0-6.3 (Luo ja Zhou, 2006).  $Q_{10}$  sõltub lisaks temperatuurile (sealhulgas sessoonsusest) ka geograafilisest asukohast ja ökosüsteemi tüübist (Lloyd ja Taylor, 1994).

Temperatuuri kõrval teine olulisem mullahingamist mõjutav abiootiline faktor on mullaniiskus. Mullaniiskus mõjutab mullahingamist nii otseselt (juurte ja mikroorganismide füsioloogilised protsessid) kui kaudselt (substraatide ja hapniku difusiooni kaudu). Sõltuvalt mulla algsest niiskustasemest ja ka aastaajast võib mullahingamise ja -niiskuse vahel olla positiivne või negatiivne tagasiside (Raich ja Schlesinger, 1992; Davidson *et al.*, 2000; Saiz *et al.*, 2006). Näiteks suvel madala niiskuse korral on seos positiivne (Kim *et al.*, 2010), kuid liigniisketes tingimustes on seos negatiivne (Luo ja Zhou, 2006). Kõrge mullaniiskus vähendab hingamist, sest aeroobsete bakterite elutegevus ja orgaanilise aine lagundamine on pärsitud (Luo ja Zhou, 2006; Khomik *et al.*, 2006). Mullahingamine suureneb järsult just äärmuslikes



keskkonnatingimustes, näiteks pärast pikaajalist põuda vihma tõttu, kui mikroobid saavad taas elutegevuseks vajalikku vett kätte (Pendall *et al.*, 2004).

Mullahingamist mõjutavad oluliselt ka substraadi (varise) kättesaadavus ja kvaliteet. Varise kvaliteedist oleneb, kui kiiresti mullaorganismid selle CO<sub>2</sub>-ks muudavad (Buchmann, 2000; Davidson *et al.*, 2006). Kõige kiiremini lagundatakse suhkrud ja erinevat tüüpi tselluloosid, kõige aeglasemalt lagunevad ligniinid ja fenoolid ning humiinhape (Luo ja Zhou 2006).

## **2.1 Autotroofne mullahingamine**

Autotroofne ehk juurehingamine (Ra) on juurte, risosfääri ja mükoriisa hingamine (Ryan ja Law, 2005). Autotroofne hingamine võib moodustada 10-90% koguhingamisest, sõltudes taimkattest ja aastaajast (Hanson *et al.*, 2000; Melillo *et al.*, 2002).

Autotroofne hingamine suureneb eksponentsiaalselt temperatuuri tõusuga, kusjuures juurehingamise kiirus kasvab temperatuuri tõusuga rohkem kui mikroobse hingamise kiirus (Ruehr ja Buchmann, 2009) ja noored juured on temperatuuritundlikumad kui vanemad juured (Luo ja Zhou, 2006). Samuti mõjutab temperatuur autotroofset hingamist läbi juurte kasvu, sest nii ühe- kui mitmeaastaste taimede juured kasvavad kiiremini kõrgema temperatuuri juures. Juurehingamine sõltub juureproduktsioonist ja -biomassist, mis on omakorda seotud ökosüsteemi produktsiooni ja taimede süsiniku allokatsiooniga (maapealne: maa-alune C jaotumine), varieerudes aastaajati ja erinevates metsa kasvukohatingimustest (Luo ja Zhou, 2006).

## **2.2 Heterotroofne mullahingamine**

Heterotroofne hingamine (Rh) on lagunemishingamine, mis on põhjustatud mulla mikro- ja makroorganismide värske ja vanema orgaanilise aine lagundamisega seotud hingamisest (Ruehr ja Buchmann, 2009). Hetero- ja autotroofne hingamine reageerivad erinevalt keskkonnateguritele (Ryan ja Law, 2005). Näiteks on Hanson *et al.* (2000) leidnud, et veestressi tingimustes on heterotroofse hingamise osakaal suurem autotroofsest hingamisest. Heterotroofne hingamine sõltub eelkõige substraadi kvaliteedist ja kogusest (Rh suureneb, kui varise kogus suureneb, Sulzman *et al.*, 2005). Heterotroofset hingamist kontrollivad ka mullaniiskus ja temperatuur, mis reguleerivad ensüümide aktiivsust (Ryan ja Law, 2005; Pendall *et al.*, 2004). Optimaalsest

kõrgem temperatuur vähendab lagunemishingamist, sest mikroobide aktiivsus langeb (Allison ja Treseder, 2008).

Heterotroofse hingamise osakaal on suurem okaspuumetsades, ulatudes umbes 70%-ni koguhingamisest (Buchmann, 2000), samas kui lehtpuumetsades on olulisem autotroofse hingamise proportsioon (Boone *et al.*, 1998).

Kõige levinum heterotroofse hingamise mõõtmise meetod on nn *trenching* ehk juurte läbilõikamise meetod (Epron, 2009). Meetodi käigus eemaldatakse mõõdetavalt alalt taimestik ning mõõtmisala-alune mullakiht ja selles kasvavad juured eraldatakse ümbritsevast kraavi kaevamise või plastikust toru sisestamise abil. Kraavi või toru sügavus peab seejuures olema vähemalt sama sügav, kuhuni ulatuvad juured (tavaliselt vähemalt 30 cm) (Epron, 2009). Mullahingamise mõõtmisperioodi ajal lõigatakse pidevalt alustaimestiku maapealsed osad ära, et vältida juurte edasist kasvu ja hingamist, samuti takistab juurte kasvu mulda sisestatud plastikust toru või muu isoleermaterjal. *Trenching* meetodi rakendamine peatab juurte kasvu ning sellega seotud autotroofse hingamise, seega on antud alalt mõõdetud CO<sub>2</sub> vaid lagunemisega seotud ehk heterotroofne hingamine. *Trenching* meetodi puuduseks loetakse keskkonnatingimuste muutumist isoleeritud mullakogumi sees. *Trenching* toru sees võib suurenedagi mullaniiskus, sest enam ei ole vett tarbivaid juuri. Samuti tekib mullas esialgu rohkelt juurevarist, mida mikroorganismid lagundama hakkavad, suurendades heterotroofse hingamise osakaalu (Comstedt *et al.*, 2011). Pikemas ajaskaalas võib *trenching* meetodika lagunemishingamist hoopis alahinnata, sest mulda ei lisandu juurevarist, mida lagundajad tarbida saaksid (Epron, 2009).

### 2.3 Peenjuured

Peenjuured on lühikese eluea ja kiire ringega, läbimõõdult alla 2 mm juured, mis varustavad taime toitainete ja veega (Ostonen *et al.*, 2005; Majdi *et al.*, 2005). Peenjuurtel on oluline roll metsaökosüsteemis, sest nende kaudu liigub taime maapealsetes osades toodetud süsinik mulda, seega mõjutavad muutused peenjuurte biomassis ja käibekiiruses oluliselt metsamulla süsinikuringet (Rasse *et al.*, 2005; Lukac *et al.*, 2009).

Peenjuurte biomass sõltub mitmetest keskkonnatingimustest, sealjuures veest ja toitainete kättesaadavusest. Vee ja toitainete stressitingimustes juhitakse tavapärasest enam fotosünteesitud

süsinikust peenjuurtesse ja mükoriisasse, et säiliks nende biomass, millega tagatakse taime varustamine vee ja toitainetega (Lukac ja Godbold, 2011). Valdav osa peenjuurte biomassist asub metsamulla kõdukihis ja ülemises mineraalkihis, kus on ka suurim mulla orgaanilise süsiniku (SOC) kontsentratsioon ning kus toimub enamus lagunemis- ja hingamisprotsessidest (Ostonen *et al.*, 2005; Lukac ja Godbold 2011).

Peenjuurte biomassi määramisel on oluline võtta arvesse nii puude kui alustaimestiku peenjuured, sest viimastel võib olla oluline osakaal kogu peenjuurte biomassist. Näiteks on Finér *et al.* (2011) leidnud, et alustaimestiku peenjuured moodustasid 31% ja 20% kogu peenjuurte biomassist vastavalt boreaalsetes ja parasvöötme metsades.

### 3 Katseala kirjeldus

Uurimus viidi läbi Tartumaal, Tõravere meteoroloogiajaama lähedal asuvas jänsekapsa kuusikus (Joonis 1). Ala koordinaadid on 58°16' 30''N ja 26° 27' 37''E. Uurimisala kuulub Euroopa metsaseire koostööprogrammi (ICP Forests) II astme metsaseirejaamade võrgustikku. Seireprogrammi raames hinnatakse alal võrade seisundit, puidu juurdekasvu, alustaimestiku keemiat ja biomassi, puistu varist ja okkakeemiat, depositsiooni, mulda ja mullalahust ja välisõhu kvaliteeti. Tõravere seireala puistu kuulub 1A boniteediklassi, vanus on 58 a ning esimese puurinde moodustab 98% harilik kuusk (*Picea abies*) ja 2% harilik mänd (*Pinus Sylvestris*). Puude tihedus on 650 tk ha<sup>-1</sup> ning puistu keskmine kõrgus on 24,5 m. Põõsarindes esineb sarapuud (*Corylus avellana*) ning alustaimestikus domineerivad harilik jänsekapsas (*Oxalis acetosella*) ja sõnajalad (*Dryopteris carthusiana*, *Athyrium filix-femina*). Pillatult kasvab võsaülane (*Anemone nemorosa*) ja leseleht (*Maianthemum bifolium*). Samblarinne on keskmise tüsedusega, domineerivad harilik laanik (*Hylocomium splendens*) ja harilik palusammal (*Pleurozium schreberi*). Tõravere uurimisala mullatüübiks on WRB 2015 klassifikatsiooni järgi *Haplic Luvisol* ehk leetjas muld (Joonis 1). Kõduhorisont praktiliselt puudub, huumus- ehk A horisont on 18 cm sügav. Mulla süsinikutagavaraks on hinnatud 83.6 t C ha<sup>-1</sup>, muld on viljakas, A horisondi C:N on 16.5, ja ülemise mullakihi pH(CaCl<sub>2</sub>) on 5.2 (Keskkonnaagentuur).

Tartu-Tõravere meteoroloogiajaama andmetel oli uurimisperioodil ehk 2016. aastal Tõravere keskmine õhutemperatuur 7.9 °C (amplituud -30–31.5 °C) ning summaarne sademete hulk 788 mm (Riigi Ilmateenistus).



Joonis 1: Vasakul Tõravere seireala ülevaade (foto: Ivika Ostonen-Märtin, Tartu Ülikool). Paremal Tõravere seireala mullakaeve (foto: Endla Asi, Keskkonnaagentuur).

## 4 Materjalid ja metoodika

### 4.1 Mullahingamise mõõtmise

Mullahingamise mõõtmisi viidi läbi perioodil aprill kuni detsember 2016, kahe kuni kolme nädala järel (kokku 15 korda aasta jooksul). Mõõtmised teostati kaasaskantava infrapuna gaasianalüsaatoriga (EGM-4; PP Systems International Inc., Amesbury, MA, USA) koos läbipaistmatu suletud dünaamilise kambriga (SRC-1; PP Systems International Inc). EGM-4 üks mõõtmistsükkel oli 124 sekundit, mille jooksul tehti ühest punktist 27 mõõtmist. Enne igat mõõtmist õhutati kambrit 15 sekundit, et saavutada õhus olev CO<sub>2</sub> kontsentratsioon.

Mulla koguhingamist (Rs) mõõdeti igal välitööpäeval 11 punktist, mis olid juhuslikult valitud ja püsivalt tähistatud PVC rõngastega. Rõngaste seest lõigati enne mõõtmist ära rohelised taimeosad, et vältida fotosünteesi ja mõõta ainult mullast eralduvat CO<sub>2</sub>-te. Vigase mõõtmistulemuse (nt õhu juurdepääs kambrisse) korral tehti alal kordusmõõtmised.

Lisaks mõõdeti iga kord ka heterotroofset mullahingamist 6 erinevast punktist. Heterotroofse mullahingamise mõõtmiseks kasutati *trenching*-ut ehk juurte läbilõikamise meetodit. 2015 ja 2016 aasta aprillis paigaldati uurimisalale mõlemal aastal kolm 50 cm pikkust (läbimõõt 18.5 cm) PVC toru (nn uued ja vanad Rh torud, millest vanad olid mullas olnud 1 a. kauem kui uued torud), mis sisestati 40 cm sügavusele mulda. Rh torud (kokku 6 tk) asusid üksteisest vähemalt 4 m kaugusel. Torud lõikasid läbi puude ja alustaimestiku peenjuured, elimineerides seeläbi peenjuurte edasise kasvu ja sellega kaasneva juure- ehk autotroofse hingamise. Seega sai PVC toru seest mõõta ainult mulla orgaanilise aine lagunemisega seotud hingamist. 40 cm sügavust peeti piisavaks, sest Ostonen *et al.* (2005) on näidanud, et umbes 90% peenjuurtest asub mulla kõdukihis ja ülemises 20 cm minaraalkihis.

Mitmed teadlased (Epron, 2009; Varik *et al.*, 2015) on leidnud, et heterotroofse toru sees oleva mulla omadused muutuvad võrreldes ümberkaudse häirimata mullaga, mistõttu on oht, et PVC toru seest mõõdetud Rh voog on ülehinnang (Comstedt *et al.*, 2011). Eesmärgiga võrrelda PVC toru sees ja väljaspool oleva mulla niiskust ja lasuvustihedust, võeti 2016. a detsembris pärast viimast mõõtmistsükli Rh torude seest ja väljast mullapuuriga mullaproovid ja torud eemaldati.

Mullahingamine (Rs ja Rh) arvutati vastavalt ideaalgaasi võrrandile kasutades kontsentratsiooni muutust ajas (võrrand 1):

$$F = S \times \frac{p \times M \times V}{T_a \times R_u \times A} \quad (1)$$

Võrrandis kasutatud tähised:

F- CO<sub>2</sub> voog mullast (g CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>)

S- lineaarne tõus (tuletatud CO<sub>2</sub> kontsentratsiooni muutusest ajas)

p- õhurõhk (mb)

M- CO<sub>2</sub> molaarmass (44.01 g mol<sup>-1</sup>)

V- pimekambri ruumala (1171 cm<sup>3</sup>)

T<sub>a</sub>- õhutemperatuur mõõtmise ajal (°K)

R<sub>u</sub>- universaalgaasikonstant (8.314 J mol<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>)

A- pimekambri all oleva mulla pindala (m<sup>2</sup>)

Mullahingamise modelleerimisel rakendati ainult neid mõõdetud väärtuseid, mille R<sup>2</sup> oli >0.90, et tagada CO<sub>2</sub> voo arvutamisel kvaliteetsed andmed.

## 4.2 Peenjuurte biomassi mõõtmine

Tõravere metsaseireala peenjuurte biomass määrati mullamonoliitide meetodil. Aprillis 2017 koguti umbes 30 cm sügavuselt mullapuuriga (sisemine läbimõõt 38 mm) 10 monoliidi proovi. Mullamonoliidi proovidest pesti Tartu Ülikooli geograafia laboris manuaalselt välja peenjuured, mis jagati seejärel mikroskoobi ja välise vaatluse (värvus, plastilisus, kõvadus) abil kuuse ja rohhtaime peenjuurteks (Persson, 1983). Juureproovid kuivatati 65 °C juures 48 tundi ja kaaluti 0.05 g täpsusega. Kuiva juuremassi ja mullapuuri pindala alusel arvutati kuuse ja rohhtaime peenjuurte biomass pindalaühiku kohta.

## 4.3 Mullatemperatuuri ja -niiskuse mõõtmine ja õhutemperatuuri andmed

Mullatemperatuuri ja -niiskuse andmete mõõtmiseks paigaldati Tõravere katseala keskele 5-7 cm sügavusele mulda logger (Em50; Decagon Devices, Pullman, WA, USA) koos 4 sensoriga (5TM; Decagon Devices). Sensorid paigaldati erinevatesse suundadesse loggerist umbes 1,5 m kaugusele. Mullatemperatuuri ja -niiskuse väärtused salvestati 1 tunnise intervalliga.

Õhutemperatuuri ja sademete andmed saadi 1 tunni täpsusega lähedalasuvast Tartu-Tõravere meteoroloogiajaamast (Riigi Ilmateenistus).

#### 4.4 Andmete analüüs

Andmeanalüüsiks kasutati programmi Statistica 7.1 (StatSoft, Inc., 2005), seades olulisusnivooks  $p < 0.05$ . Mõõdetud mullahingamise väärtused logaritmiti andmete jaotuvuse parandamiseks. Mullahingamise seost keskkonnaparameetritega (õhutemperatuur, mullatemperatuur, mullaniiskus) analüüsiti mitmese regressioonanalüüsiga (*multiple stepwise regression analysis*,  $\alpha = 0.05$ ). Student t-testiga (95% usalduspiiride kattuvusega) võrreldi samal päeval mõõdetud kogu- ja heterotroofse hingamise erinevust, uuest ja vanast Rh torust mõõdetud heterotroofse hingamise erinevust ning mõõtmistsükli lõpus (dets. 2016) Rh torude sees ja läheduses oleva häirimata mulla mullaniiskuse ja –lasuvustiheduse erinevust.

Mitmene regressioonanalüüs näitas, et mullahingamist mõjutab oluliselt vaid mullatemperatuur. Seega modelleeriti aastane kogu- ja heterotroofne mullahingamine kasutades van't Hoff eksponentfunktsiooni (Rayment and Jarvis, 1997; Davidson *et al.*, 2006), mis kirjeldab mullahingamise ja temperatuuri seost (võrrand 2):

$$R = a \exp^{bT_s} \quad (2)$$

Võrrandis kasutatud tähised: R mullahingamine,  $T_s$  mullatemperatuur ( $^{\circ}\text{C}$ ), a on funktsiooni parameeter, b on temperatuurikoefitsient.

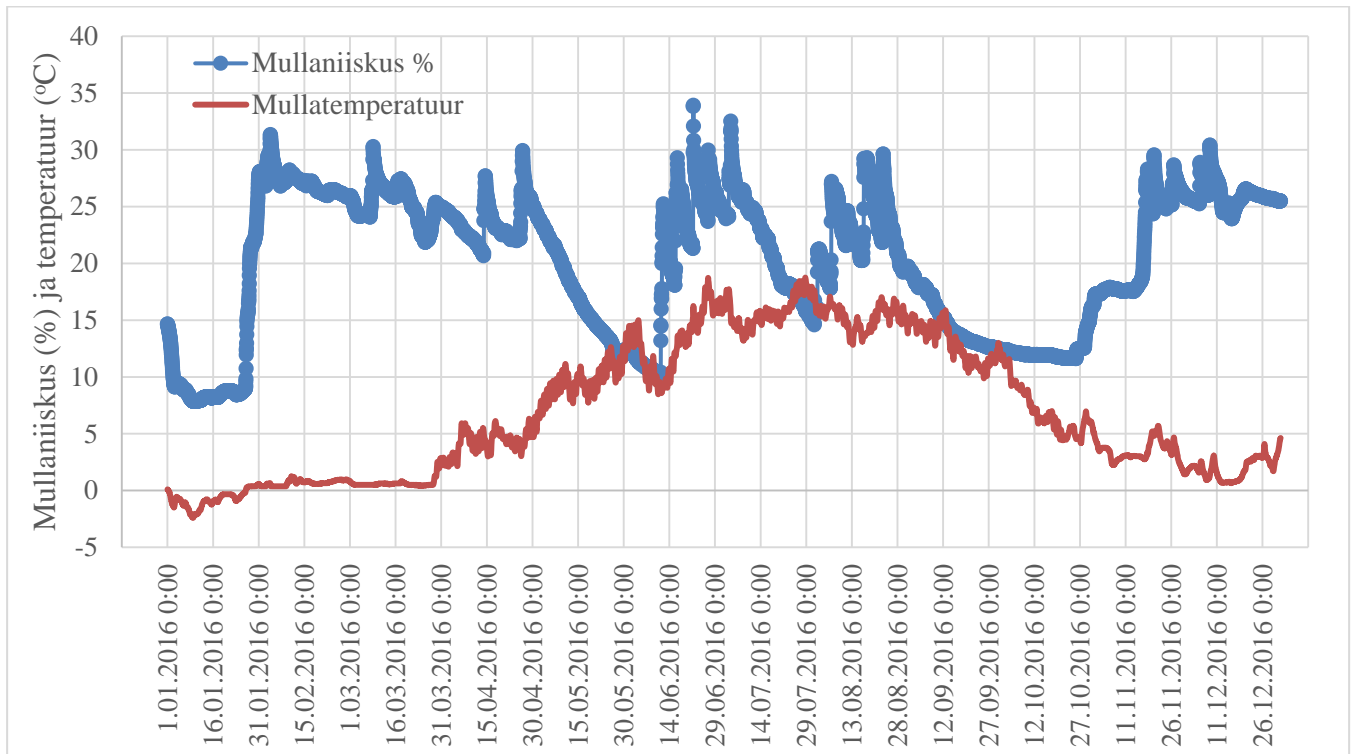
Võrrandi 2 temperatuurikoefitsiendi järgi arvutati mullahingamise temperatuuritundlikkus (võrrand 3):

$$Q_{10} = \exp^{b10} \quad (3)$$

## 5 Tulemused

### 5.1 Mullaparametrid

Joonisel 2 on näidatud Tõravere kuusiku 2016. aasta hooajaline mullatemperatuuri ja –niiskuse käik. Mullatemperatuuril esines selge sempoonsus, varieerudes piirides -2.4 kuni 18.7°C, aasta keskmine mullatemperatuur oli 7.0 °C. Mullaniiskus varieerus oluliselt rohkem kui mullatemperatuur. Minimaalne mullaniiskus esines jaanuaris (7.8%) ja maksimaalne juunis (33.9%). 2016. aasta keskmine mullaniiskus oli Tõravere kuusiku metsaseire alal 20.2%.



Joonis 2: Tõravere kuusiku 2016. a mullatemperatuur ja -niiskus.

2016. a detsembris mõõdetud uue Rh toru (7 kuud maas olnud) ja vana Rh toru (19 kuud maas olnud) mullaniiskus oli vastavalt 21.8% ja 22.1% ning omavahel oluliselt ei erinenud ( $p=0.7$ ). Samuti ei erinenud omavahel uue ja vana Rh toru mulla lasuvustihedused ( $p=0.7$ ), mis olid vastavalt 0.98 ja 0.95 g cm<sup>-3</sup>. Kuna eelmainitud keskkonnaparametrid Rh torude sees omavahel ei erinenud, võis neid edaspidises analüüsis ühe valimina kasutada.



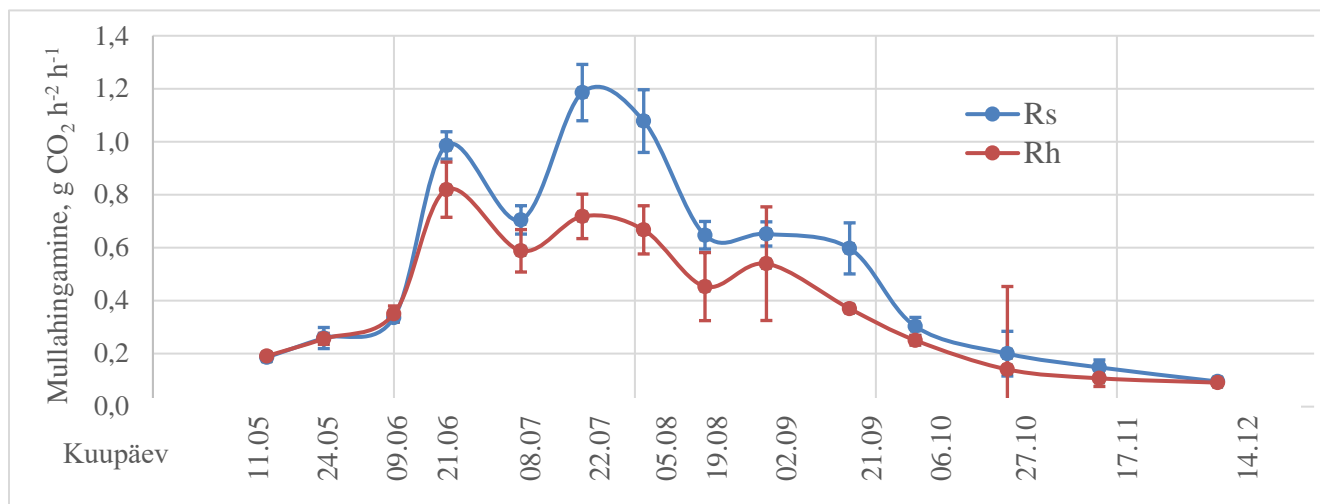
Rh torude (uus+vana) keskmine mullaniiskus oli 22.0% ning see oli oluliselt kõrgem, kui lähedaloleva häirimata mulla niiskuse, mis oli 20.3% ( $p=0.01$ ). Rh torude ( $0.97 \text{ g cm}^{-3}$ ) ja häirimata mulla ( $1.03 \text{ cm}^{-3}$ ) lasuvustihedused omavahel ei erinenud ( $p=0.4$ ).

## 5.2 Mullahingamine

Joonisel 3 on välja toodud igal välitööpäeval mõõdetud empiirilised mullahingamise vood. Koguhingamine ( $R_s$ ) suurenes järsult juunis - kui kuu alguses mõõdeti koguhingamise vooks  $0.336 \text{ g CO}_2 \text{ h}^{-2} \text{ h}^{-1}$ , siis kuu teisel poolel juba  $0.986 \text{ g CO}_2 \text{ h}^{-2} \text{ h}^{-1}$ . Maksimaalne mõõdetud  $R_s$  voog esines 27. juulil 2016 ( $1.186 \text{ g CO}_2 \text{ h}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ), kuid ka augusti alguses (5.08.2016) oli  $R_s$  maksimaalse lähedane ( $1.078 \text{ g CO}_2 \text{ h}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ), pärast mida hakkas Tõravere kuusiku koguhingamine vähenema. Minimaalsed  $R_s$  vood mõõdeti 2016. aasta hilissügisel ja talvel, olles madalaim 14. detsembril ( $0.095 \text{ g CO}_2 \text{ h}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ). Mais, novembris ja detsembris kogu- ja heterotroofse hingamise väärtused praktiliselt kattusid, mis näitab, et  $R_s$ -i moodustas sisuliselt ainult heterotroofne hingamine ning autotroofse hingamise osakaal peaaegu puudus. Minimaalne mõõdetud  $R_s$  voog talvel oli umbes 12 korda madalam, kui suvel mõõdetud maksimaalne  $R_s$  voog.

Mõõdetud keskmine heterotroofne hingamine ( $R_h$ ) (6 Rh toru keskmine) oli alati madalam koguhingamisest, välja arvatud kevadel (11.05 ja 24.05), umbes 1.5 kuud pärast uute Rh torude sisestamist. Juurte läbilõikamine PVC toru sees põhjustas ilmselt kiirema juurte lagunemise ja veidi kõrgema  $R_h$  voo, kui häirimata mullal mõõdetud  $R_s$  voog. Mõõdetud  $R_h$  voog oli koguhingamisest oluliselt madalam ( $p<0.05$ ) maksimaalsel taimede kasvuperioodil (mõõdetud 22.07, 5.08, 19.08 ja 21.09). Maksimaalne  $R_h$  voog mõõdeti juunis (21.06.2016,  $0.819 \text{ g CO}_2 \text{ h}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ) ja minimaalne detsembris ( $0.091 \text{ g CO}_2 \text{ h}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ) (Joonis 3). Oluline erinevus kogu- ja heterotroofse hingamise vahel suvel viitab autotroofse hingamise osakaalu tõusule, mis tuleneb vegetatsiooniperioodil aktiivsest taimede ja peenjuurte kasvust.

Empiirilistel mullahingamise andmetel esines otsene seos ainult temperatuuriga. Mullaniiskuse seost hingamisega nii nähtavalt ei esinenud, v.a. juuni alguses, kui niiskus ja mullahingamine hüppeliselt tõusid (Joonis 2). Mullaniiskus tõusis 10. juunil 10.4%,-t 33.9%-ni 21. juulil, mis võis olla üks mullahingamise järsu tõusu põhjus  $0.336 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$  9. juunil  $1.186 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$  peale 22. juulil.



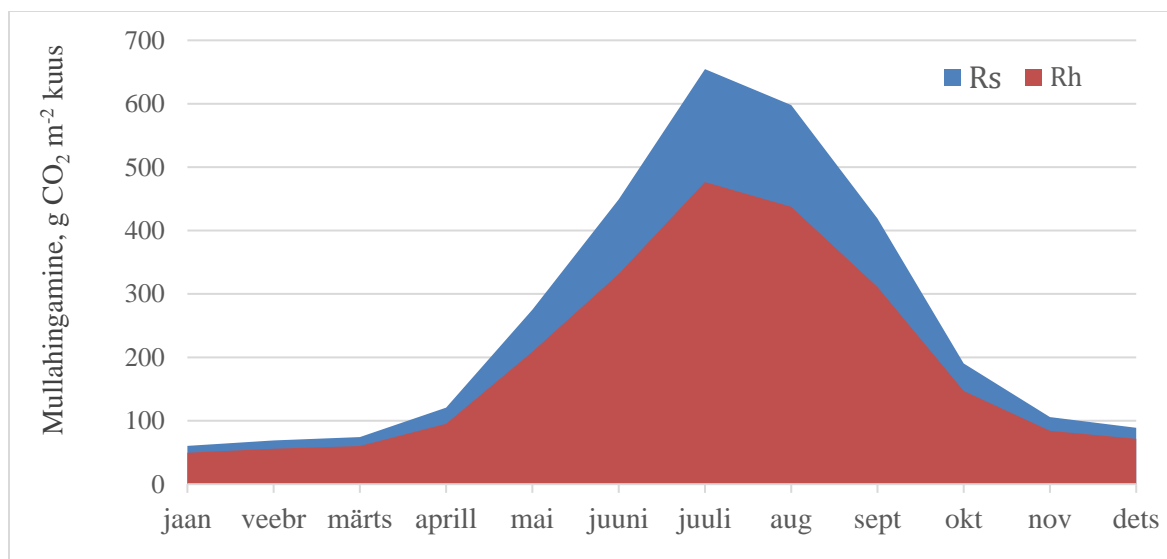
Joonis 3: 2016. aastal välitöö päevadel mõõdetud kogu mullahingamine (Rs) ja heterotroofne hingamine (Rh) ( $\pm$  standardviga)

Mullahingamise mitmene regressioonanalüüsi mudel, mis sisaldas 3 muutujat (õhutemperatuur, mullatemperatuur ja mullaniiskus) näitas, et Tõravere kuusikus esineb oluline seos ainult mullahingamise ja mullatemperatuuri vahel, nii Rs kui Rh puhul. Seetõttu modelleeriti mullahingamise sõltuvus ainult mullatemperatuurist, mille tulemusena saadi kogu mullahingamise ja heterotroofse mullahingamise korrelatsioonivõrrandid (võrrandid 4 ja 5), mille baasil modelleeriti vastavad kuu summaarsed ja aastased mullahingamise väärtused.

$$Rs = \exp(-2,412) * \exp(0,143 * Ts), R^2=0.77, p<0.001 \quad (4)$$

$$Rh = \exp(-2,617) * \exp(0,136 * Ts), R^2=0.90, p<0.001 \quad (5)$$

Võrrandis kasutatud tähised: Rs ja Rh on vastavalt kogu mullahingamine ja heterotroofne mullahingamine, Ts on mullatemperatuur



Joonis 4: 2016. aasta modelleeritud sesoonne kogu- ja heterotroofne mullahingamine.

Joonisel 4 on näidatud modelleeritud kuu summaarsed hingamisvood ning selgelt on näha nii Rs kui Rh temperatuurist põhjustatud sesoonsus. Keskmine mullahingamine perioodil märtsist maini oli  $157 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ , juunist augustini  $567.3 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ , septembrist novembrini  $181 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$  ning detsembrist veebruarini  $59 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ . Kõige madalam Rs ja Rh esinesid jaanuaris, vastavalt  $60$  ja  $49 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2}$  kuus. Kõrgeim mullahingamine toimus juulis, kui Rs ja Rh olid vastavalt  $655$  ja  $476 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2}$  kuus. Rh ja Rs vahe kasvas juulini, saavutas siis maksimumi ( $178 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ) ning edaspidi langes. Hooajaliselt muutus ka Rh/Rs suhtarv, olles kõrgeim jaanuaris (82%) ja madalaim juulis (73%), mis on selgitatav autotroofse hingamise osakaalu tõusuga suvel seoses taimede ja juurte kasvuga vegetatsiooniperioodil. Rh osakaal aastasest koguhingamisest oli 75%.

Tõravere kuusiku koguhingamiseks hinnati 2016. aastal  $3.1 \text{ kg CO}_2 \text{ m}^{-2}$  aastas ehk  $8.5 \text{ t C ha a}^{-1}$  ja heterotroofse hingamise vooks  $2.3 \text{ kg CO}_2 \text{ m}^{-2}$  aastas ehk  $6.4 \text{ t C ha a}^{-1}$ .

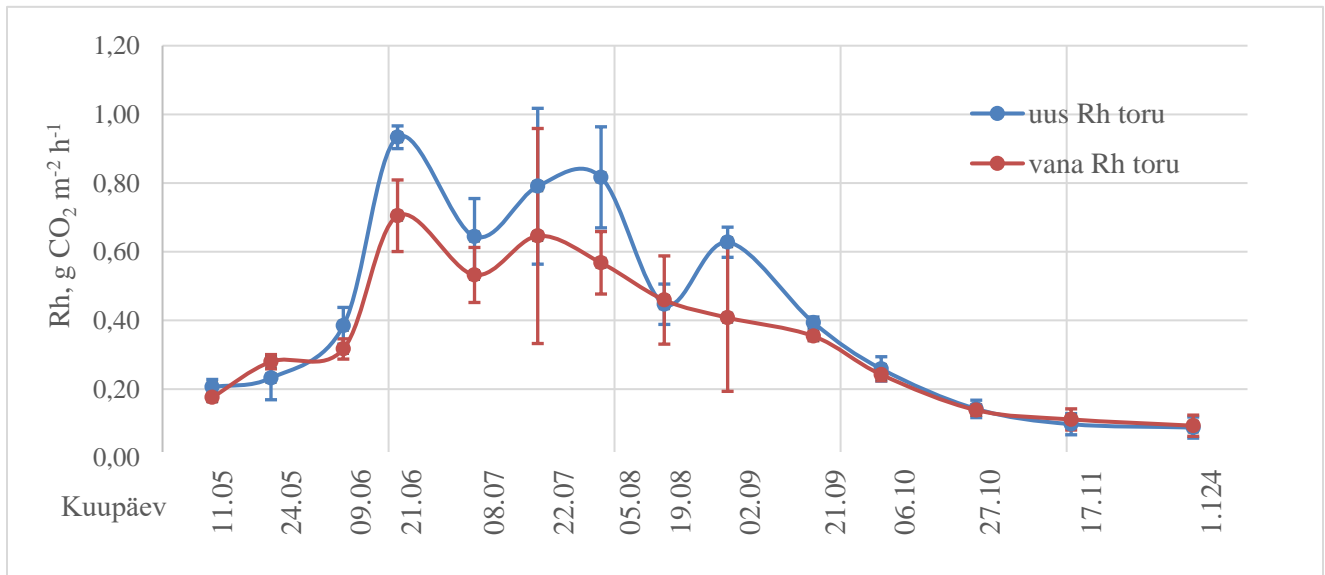
Koguhingamise  $Q_{10}$  väärtus oli 4.2 ja heterotroofse hingamise  $Q_{10}$  3.9, mis näitab, et koguhingamine oli temperatuuritundlikum. Koguhingamine koosnes nii auto- kui heterotroofsest hingamisest, mistõttu võib järeldada, et nende kahe hingamisvoo kombineeritud temperatuuritundlikkus on suurem kui ainult Rh temperatuuritundlikkus.

### 5.3 *Trenching* meetodika ajaline mõju heterotroofsele mullahingamisele

Joonisel 5 on näha uuest Rh torust (paigaldatud 2016 aprill) ja vanast Rh torust (paigaldatud 2015 aprill) mõõdetud heterotroofse hingamise keskmisi väärtuseid.

Uuest Rh torust mõõdetud heterotroofne hingamine oli absoluutväärtuselt alati kõrgem (v.a. 24.05), kui aasta varem paigaldatud Rh torust mõõdetud hingamine, kuid erinevate torude seest mõõdetud Rh kordagi statistiliselt oluliselt ei erinenud ( $p > 0.05$ ). Seega võib järeldada, et *trenching* meetodi lühiajaline rakendamine, nt 1-2 aastat, käesoleval juhul süstemaatilist viga heterotroofse hingamise väärtustes ei põhjusta.

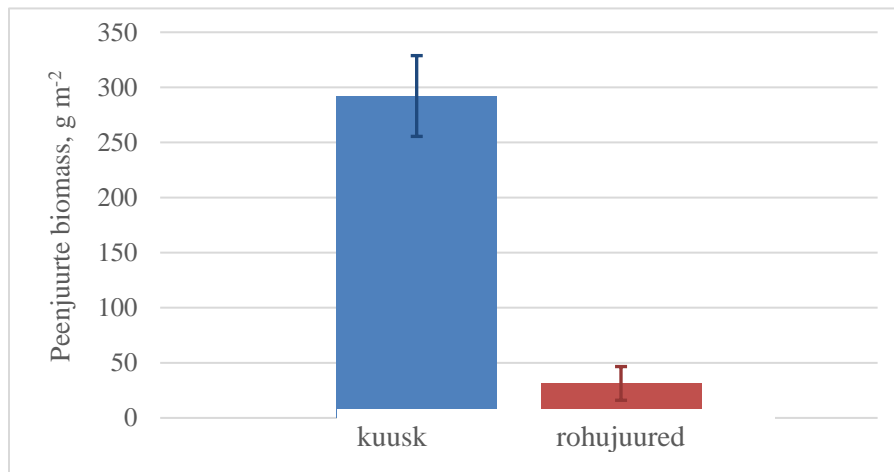
Kuna niiskustingimused uue ja vana toru sees ei erinenud, tuleneb Rh erinevus tõenäoliselt lagundamiseks kättesaadava orgaanilise aine ehk juurevarise kogusest torude sees. Uutes Rh torudes on alles rohkem värsket lagunevat materjali, samas kui vanades torudes on see juba mikroobide poolt ära kasutatud. Jooniselt 5 on näha, et nii uuest kui vanast torust mõõdetud Rh väärtused järgisid paralleelselt aastaajalist trendid, millest võib järeldada, et mikroobid on aktiivsed just suvel, kui heterotroofne hingamine on kõrgem, aga vähem aktiivsed talvel ja sügisel, kui Rh väheneb. Nii uue kui vana Rh toru seest mõõdetud hingamise vood olid suurimad samal päeval, 21. juunil 2016, vastavalt 0.93 ja 0.70 g CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>.



Joonis 5: 2016. a uue ja vana Rh toru seest mõõdetud heterotroofne hingamine ( $\pm$  standardviga).

## 5.4 Peenjuurte biomass

Joonisel 6 on näidatud Tõravere metsaseireala kuuse ja alustaimestiku peenjuurte 2016. aastal mõõdetud biomassid. Kogu peenjuurte biomassiks määrati  $323.5 (\pm 43) \text{ g m}^{-2}$ , millest kuuse peenjuured moodustasid  $292.1 (\pm 37) \text{ g m}^{-2}$  ja alustaimestiku peenjuured  $31.3 (\pm 15) \text{ g m}^{-2}$ . Alustaimestiku peenjuurte biomass moodustas 10.7% kogu peenjuurte biomassist.



Joonis 6: Tõravere kuusiku peenjuurte biomassid.

## 6 Arutelu

Tõravere kuusikus näitasid nii empiiriliselt mõõdetud kui modelleeritud mullahingamise vood tugevat sesoonset trendi, olles madalaim jaanuarist märtsini,  $R_s$  suurenes kiirelt vegetatsiooniperioodi alguses - aprillist juulini, oli maksimaalne juuli ja augusti kuus ning hakkas seejärel taas langema (Joonis 4). Sarnast hooajalisust on täheldanud paljud teised uuringud, näiteks Buchmann (2000), Fahey et al. (2005), Luo ja Zhou (2006), Kukumägi (2007), Comstedt et al. (2011) ja Kukumägi et al. (2011, 2017). Kukumägi et al. (2017) näitas, et Järveljal kasvava 82-aastase hariliku kuusiku keskmine mullahingamise voog perioodil mai-oktoober oli  $0.63 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ , Tõravere kuusikus oli sama perioodi keskmine  $R_s$   $0.69 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ . Tõravere kuusiku maksimaalne koguhingamine esines juulis, kui keskmine  $R_s$  oli  $0.88 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ , mis on väga sarnane Comstedt et al. (2011) tulemustele, kes leidsid, et umbes 70-aastase Lõuna-Rootsis kasvava hariliku kuusiku maksimaalsed hingamisvoog toimuvad samuti juulis, olles  $0.84 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ .

Kuigi mitmed uuringud on näidanud, et mullahingamist reguleerivad eelkõige temperatuur ja niiskus (Luo ja Zhou 2006), siis antud töö mitmene regressioonanalüüs näitas, et Tõravere kuusikus määras nii kogu- kui heterotroofse hingamise oluliselt vaid mullatemperatuur. Kukumägi (2007) leidis, et Järveljal kasvava kuuse-kase segapuistu koguhingamist mõjutas oluliselt nii mullatemperatuur kui -niiskus, samas oli mullaniiskusel hingamisega vaid nõrk positiivne seos. Arvatavasti ei mõjuta mullaniiskus Tõravere mullahingamist oluliselt seetõttu, et Tõraveres on optimumilähedane mullaniiskus ning seal ei esine veestressi. On leitud, et mulla  $\text{CO}_2$  voog sõltub niiskusest just liiga kuivades või liigniisketes tingimustes (Luo ja Zhou, 2006). Samas näitasid empiirilised mõõtmistulemused hingamisvoogude langust ka vegetatsiooniperioodi keskel (8.07, Joonis 3), mis ei olnud otseses seoses mullatemperatuuriga. Seega mõjutas hingamisvooge lühiajaliselt tõenäoliselt lisaks temperatuurile ka niiskus (sademed) või nende mõlema kombinatsioon.

*Trenching* mõju mullahingamise tulemustele on erinev. On teada, et *trenching* meetod võib tekitada suurema mullaniiskuse taseme, sest pole juuri, mis vett ära kasutaks (Epron et al. 1998; Buchmann 2000), samuti võivad ilmned kõrgemad  $\text{CO}_2$  vood kõrgema lagundamise tulemusel, nagu on märganud paljud, kaasaarvatud Buchmann (2000), Comstedt, et al. (2011) ning Bhupinderpal et al. (2003). *Trenching* meetod võib tulemused muuta ebatäpseteks eriti kuival

perioodil, sest siis on niiskusesisaldus *trenching* meetodit kasutades suuresti erinev tavalisest niiskusesisaldusest. Samas käesolevas töös olulist erinevust heterotroofse hingamise voos ega niiskusesisalduses kahe erineva vanusega *trenching* torus ei esinenud. Aga *trenching* suurendas oluliselt mullaniiskust Rh torude sees võrreldes häirimata mullaga. Samas oli niiskuse erinevus absoluutväärtuses väike häirimata mulla ja Rh torude vahel (1.7%). Samas Kukumägi *et al.* (2017) leidsid, et mullaniiskus Rh torudes suurenes 40%.

Tõravere kuusiku koguhingamise  $Q_{10}$  väärtuseks saadi 4.2, mis jääb Euroopa ja Põhja-Ameerika metsades  $Q_{10}$  varieeruvuse piiridesse, mis on 2.0-6.3 (Luo ja Zhou, 2006). Kukumägi (2007) hindas nii 54- kui 84-aastase Järvelja kuuse-kase puistute  $Q_{10}$  väärtuseks 5.3, samas kui Buchmann (2000) leidis, et Saksamaal 87-aastase hariliku kuusiku temperatuuritundlikkus oli Tõravere kuusikust madalam ( $Q_{10}=3.8$ ). Erinevad  $Q_{10}$  tulemused on põhjustatud näiteks metsa kasvukoha mullatemperatuurist, sest SOM-i lagundavad mikroobikooslused muutuvad sõltuvalt mullatemperatuurist (Lloyd ja Taylor, 1994). Samas on oluline, kui sügavalt mullatemperatuuri mõõdetakse (Davidson *et al.*, 1998; Khomik *et al.*, 2006).  $Q_{10}$  sõltub ka mullaniiskuse sisaldusest, näiteks leidsid Xu ja Qi (2001), et  $Q_{10}$  väärtused on tavaliselt kõrgemad niiskematel aladel.

Tõravere kuusiku kõikide peenjuurte biomassiks määrati 2016 aastal  $323.5 \text{ g m}^{-2}$ , mis ei erine oluliselt varem (2012 a.) saadud peenjuurte biomassi väärtusest, mis oli  $365.9 \text{ g m}^{-2}$  (Kriiska *et al.*, *käsikiri*). Tõravere peenjuurte biomass oli ka samas suurusjärgus Soome kuusikutes leitud peenjuurte biomassiga, mis varieerus vahemikus 207 kuni  $552 \text{ g m}^{-2}$  (Helmisaari *et al.*, 2007). Seejuures oli Tõravere kuuse peenjuurte biomass  $295 \text{ g m}^{-2}$  ja Soomes keskmiselt  $261 \text{ g m}^{-2}$ . Kui Tõraveres moodustasid alustaimestiku peenjuured ja risoomid ca 11% kogu peenjuurte biomassist, siis Soomes varieerus alustaimestiku osakaal 1-43% (Helmisaari *et al.*, 2007), näidates alustaimestiku olulist rolli süsiniku salvestamisel ja ka kogu metsa süsinikuringes.

## Kokkuvõte

Antud töö eesmärk oli uurida Tõravere kuusiku: 1) koguhingamise ja heterotroofse hingamise vooge ja sesoonsust, 2) *trenching* meetodi ajalist mõju heterotroofsele mullahingamisele, 3) peenjuurte biomassi.

Analüüsi Tõravere metsaseireala kuusikus mõõdetud mullahingamist, mida mõõdeti perioodil aprill kuni detsember 2016. Tõravere koguhingamine oli 2016. aastal  $8.5 \text{ t C ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  ja heterotroofne hingamine  $6.4 \text{ t C ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ . Heterotroofne hingamine moodustas 75% koguhingamisest, jäädes reeglina suuremaks koguhingamisest. Katseala kuusiku mullahingamises esines tugev sesoonsus, mis regresioonanalüüsi tulemustel sõltus oluliselt ainult mullatemperatuurist. Külmemaa kliimaga aladel, nagu Eesti, on mullahingamisel suur seos temperatuuriga, sest mullahingamine sõltub vegetatsiooniperioodist. Leiti et koguhingamine on rohkem temperatuuritundlik kui heterotroofne hingamine.

Mullaniiskuse ja -hingamise vahelist olulist korrelatiivset seost ei leitud, arvatavasti sellepärast, et katsealal oli niiskusesisaldus optimaalne ning ei pärssinud mikroobide ja juurte elutegevust.

Suurim erinevus koguhingamise ja heterotroofse hingamise vahel esines ainult vegetatsiooniperioodil viidates autotroofse hingamise osakaalu suurenemisele taimede kasvuperioodil.

Erineva vanusega Rh torude vahel olulist erinevust mulla niiskusesisalduses ega heterotroofse hingamise voos ei esinenud. Samas esines erinevus mullaniiskuses Rh torude ja puutumata mulla vahel (1.7%), kuigi oli absoluutväärtuses väike.

Tõravere kuusiku kõikide peenjuurte biomassiks määrati  $323.5 \text{ g m}^{-2}$ , millest alustaimestikku peenjuured moodustasid 11%, mis näitab seda, et alustaimestikul on suur osa põhipuuliigi kõrval metsa süsinikuringes. Peenjuurte biomass ajas oluliselt ei muutunud.

Tõravere metsaseirealal võiks uurimusi jätkata, et määrata pikemaajalisem *trenching* meetoodika mõju hingamisvoogudele ning uurida detailsemalt kogu süsinikuringet.



# Soil respiration and fine root biomass in Tõravere forest monitoring site

Inge-Marit Tigas

## Summary

The aim of this thesis was to measure and study 1) total soil respiration and heterotrophic respiration fluxes and seasonality 2) the impact of *trenching* method on heterotrophic soil respiration in time 3) fine root biomass in Tõravere monitoring site.

The data was gathered from Tõravere spruce forest from april to december 2016. The total soil respiration from forest was  $8,5 \text{ t C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$  and heterotrophic respiration  $6.4 \text{ t C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ . Heterotrophic respiration constituted 75% of total soil respiration. Respiration showed noticeable seasonal trend. Soil respiration was significantly correlated only with soil temperature and fluxes followed changes in vegetation period. Total respiration showed higher temperature sensitivity than heterotrophic respiration.

There was no significant correlation between soil respiration and soil moisture, probably because the stand had optimal soil moisture conditions and the microbial and rhizosphere activity was not suppressed. The highest difference between total and heterotrophic soil respiration peaked during summertime, indicating increased contribution of autotrophic respiration.

*Trenching* had no timely effect on Rh flux and soil moisture in the Rh collar. However, the soil moisture was significantly higher (1.7%) in the Rh collar compared to undisturbed soil.

The fine root biomass in Tõravere was  $323.5 \text{ g m}^{-2}$ , of which 11% was understory fine roots, showing that understory fine roots have a significant role in addition to tree fine roots in forest carbon cycle.

It is necessary to continue with further research in Tõravere stand, in order to find more information regarding the impact of *trenching* on respiration fluxes and to examine carbon cycle in more detail.

## **Tänuavaldused**

Autor tänab juhendajat Kaie Kriiska tema osutatud abi ja nõuannete eest.

Töö autor ja juhendaja tänavad Keskkonnaagentuuri Tõraveres metsaseirealal uurimistöö läbiviimise lubamise, välitööde seadmete kasutamise ja igakülgse meeldiva koostöö eest.

## Kirjanduse loetelu

- Alcamo, J., Moreno, J.M., Nováky, B., Bindi, M., Corobov, R., Devoy, R.J.N., Giannakopoulos, C., Martin, E., Olesen, J.E., Shvidenko, A., 2007. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Cambridge, Cambridge University Press, 541–580
- Allison, S.T., Treseder, K.K., 2008. Warming and frying suppress microbial activity and carbon cycling in boreal forest soils. *Global Change Biology*, 14: 2898–2909.
- Bhupinderpal S., Nordgren A., Lofvenius M.O., Högberg M.N., Mellander P.E., Högberg P., 2003. Tree root and soil heterotrophic respiration as revealed by girdling of boreal Scots pine forest: extending observations beyond the first year. *Plant Cell Environment*, 26: 1287–1296
- Black, A.T., Gaumont-Guay, D., Jassal, R.S., Amiro, B.D., Jarvis, G., Gower, T., Kelliher, F.M., Dunn, A., Wofsy, S.C., 2005. Measurement of CO<sub>2</sub> exchange between boreal forest and the atmosphere. In: Griffiths H, Jarvis PG, eds. The carbon balance of forest biomes: 151–185 Oxford, UK Taylor & Francis
- Bond-Lamberty, B., Thomson, A., 2010. Temperature associated increases in the global soil respiration record. *Nature*, 464: 579–582
- Boone, R.D, Nadelhoffer K.J, Canary, J.D., Kaye, J.P., 1998. Roots exert strong influence on the temperature sensitivity of soil respiration. *Nature*, 396: 570–572
- Buchmann, N., 2000. Biotic and abiotic factors controlling soil respiration rates in *Picea abies* stands. *Soil Biology & Biochemistry*, 32: 1625–1635
- Campbell, J.L., Law, B., 2005. Forest soil respiration across three climatically distinct chronosequences in Oregon. *Biogeochemistry*, 73:109–25
- Comstedt, D., Boström, B., Ekblad, A., 2011. Autotrophic and heterotrophic soil respiration in a Norway spruce forest: estimating the root decomposition and soil moisture effects in a trenching experiment. *Biogeochemistry*, 104: 121–132.
- Cox P.M., Betts R.A., Jones C.D., Spall S.A. and Totterdell I.J. 2000. Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model. *Nature*, 408: 184–187
- D.W., Law, B.E., Luo, Y., Megonigal, J.P., Olsrud, M., Ryan, M.G., Wan, S., 2004. Below-ground process responses to elevated CO<sub>2</sub> and temperature: A discussion of observations, measurement methods, and models. *New Phytologist*, 162 (2): 311–322
- Davidson, E.A., Janssens, I.A., 2006. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. *Nature*, 440: 165–173
- Davidson, E.A., Janssens, I.A., Luo, Y.Q., 2006. On the variability of respiration in terrestrial ecosystems: moving beyond Q<sub>10</sub>. *Global Change Biology*, 12: 154–164
- Davidson, E.A., Verchot, L.V., Cattânio, J.H, Ackerman, I.L. Carvalho, J.E.M., 2000. Effects of soil water content on soil respiration in forests and cattle pastures of eastern Amazonia. *Biogeochemistry*, 48: 53–69
- Dixon, R., K., Brown S., Houghton R. A., Solomon A. M., Trexler M. C., Wisniewski J., 1994. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science*, 22: 185–190

- Eliasson, P.E., McMurtrie, R.E., Pepper, D.A., Strömberg, M., Linder, S., Ågren, G.I., 2005. The response of heterotrophic CO<sub>2</sub> flux to soil warming. *Global Change Biology*, 11: 167–181
- Epron, D., 2009. Separating autotrophic and heterotrophic components of soil respiration: lessons learned from trenching and related root-exclusion experiments. In: *Soil Carbon Dynamics: An Integrated Methodology* (eds. Kutsch W.L., Bahn M., Heinemeyer A.): 157–168 Cambridge University Press Cambridge UK
- Fahey, T.J. 2005. Soil respiration and soil carbon balance in a northern hardwood forest ecosystem. – *Canadian Journal of Forest Research*, 35: 244–253
- Finér, L., Ohashi, M., Noguchi, K., Hirano, Y., 2011. Fine root production and turnover in forest ecosystems in relation to stand and environmental characteristics. *For. Ecol. Manage.* 262, 2008–2023
- Goulden, M. L., Wofsy, S. C., Harden, J. W., Trumbore, S. E., Crill, P. M., Gower, S. T., Fires, T., Daube, B., Fan, S. M., Sutton, D. J., Bazzaz, A., Munger, J. W., 1998. Sensitivity of boreal forest carbon balance to soil draw. *Science*, 279: 214–217
- Grace, J., 2001. Carbon cycle. *Encyclopedia of Biodiversity*, Vol 1, Academic Press
- Hamdi, S., Moyano, F., Sall, S., Bernoux, M., & Chevallier, T., 2013. Synthesis analysis of the temperature sensitivity of soil respiration from laboratory studies in relation to incubation methods and soil conditions. *Soil Biology and Biochemistry*, 58, 115–126
- Hanson, P.J., Edwards, N.T., Garten, C.T., Andrews, J.A., 2000. Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: A review of methods and observations. *Biogeochemistry*, 48: 115–146
- Helmisaari, H.S., Derome, J., Nöjd, P., Kukkola, M., 2007. Fine root biomass in relation to site and stand characteristics in Norway spruce and Scots pine stands. *Tree Physiology*, 27: 1493–1504
- IPCC, 2013: Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA
- Khomik, M., Arain, M.A., McCaughey, J.H., 2006. Temporal and spatial variability of soil respiration in a boreal mixedwood forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 140 (1-4): 244–256
- Kim, D-G., Mu, C., Kang, S., Lee, D., 2010. Factors controlling soil CO<sub>2</sub> effluxes and the effects of rewetting on effluxes in adjacent deciduous, coniferous, and mixed forests in Korea. *Soil Biology & Biochemistry*, 42: 576–585
- Kirschbaum, M. U. F., 1995. The temperature dependence of soil organic matter decomposition, and the effect of global warming on soil organic C storage. *Soil Biology and Biochemistry*, 27: 753–760
- Kukumägi, M., 2007. Mullahingamise sesoonne dünaamika kuuse-kase segametsa aegruum: seosed mullatemperatuuriga ja mullaniiskusega. *Magistritöö*, Tartu

- Kukumägi, M., Uri, V., Kull, O., 2011. Mullahingamise sesoonne dünaamika kuusikute aegreas. *Metsanduslikud Uurimused*, 54: 5-17
- Kukumägi, M., Ostonen, I., Uri, V., Helmisaari, H.-S., Kanal, A., Kull, O., 2017. Variation of soil respiration and its components in hemiboreal Norway spruce stands of different ages, *Plant Soil*, 414: 265-280
- Lloyd, J., Taylor, J.A., 1994. On the temperature dependence of soil respiration. *Functional Ecology*, 8: 315-323.
- Lukac, M., Godbold, D. L., 2011. Soil ecology in northern forests: a belowground view of a changing world. Cambridge University Press, Cambridge
- Lukac, M., Lagomarsino, A., Moscatelli, M, C., De Angelis, P., Cotrufo, M.F. and Godbold, D.L., 2009. Forest soil carbon cycle under elevated CO<sub>2</sub> – a case of increased throughput? *Forestry*, 82 (1): 75-86
- Luo, Y., Zhou, X. 2006. Soil respiration and the environment. Elsevier, USA. 320 pp
- Majdi, H., Pregitzer, K., Morén, A.-S., Nylund, J.-E., I. Ågren, G., 2005. Measuring fine root turnover in forest ecosystems. *Plant and Soil*, 276 (1–2): 1-8
- Malhi, Y., Baldocchi, D.D., Jarvis, P.G., 1999. The carbon balance of tropical, temperate and boreal forests. *Plant, Cell and Environment*, 22: 715–740
- Melillo, J.M., Steudler, P.A., Aber, J.D., Newkirk, K., Bowles, F.P., Catricala, C., Magill, A. Ahrens, T., Morrisseau, S., 2002. Soil warming and carbon-cycle feedbacks to the clima system. *Science*, 298 (5601): 2173–2176
- Myneni, R.B., Keeling, C.D., Tucker, C.J., Asrar, G., Nemani, R.R., 1997. Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991. *Nature*, 386: 698–702
- Ostonen, I., Lõhmus, K., Pajuste, K., 2005. Fine root biomass, production and its proportion of NPP in a fertile middle-aged Norway spruce forest: Comparison of soil core and ingrowth core methods. *Forest Ecology and Management*, 212 (1–3): 264– 277
- Pendall, E., Bridgham, S., Hanson, P.J., Hungate, B., Kicklighter, D.W., Johnson, Peng, Y., Thomas, S.C., Dalung, T. 2008. Forest management and soil respiration: Implications for carbon sequestration. – *Environmental Reviews*, 16: 93-111
- Persson, H., 1983. The distribution and productivity of fine roots in boreal forest. *Plant Soil* 71: 87–101
- Peterjohn, W. T., Melillo, J. M., Steudler, P. A., Newkirk, K. M., Bowles, F. P., Aber, J. D., 1994. Responses of trace gas fluxes and N availability to experimentally elevated soil temperatures. *Ecological Applications*, 4: 617-625
- Raich, J. W. & Potter, C. S., 1995. Global patterns of carbon dioxide emissions from soils. *Global Biogeochem. Cycles*, 9: 23-26
- Raich, J.W., Schlesinger, W.H. 1992. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus, Series B*, (44 B): 81-99
- Rasse, D.P., Rumpel, C., Dignac, M.-F., 2005. Is soil carbon mostly root carbon? Mechanisms for a specific stabilisation. *Plant and Soil*, 269 (1–2): 341-356

- Rayment, M.B., Jarvis, P.G. 1997. An improved open chamber system for measuring soil CO<sub>2</sub> effluxes in the field. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 102(D24): 28779-28784
- Riigi Ilmateenistus. <https://www.ilmateenistus.ee/> 25.05.2018
- Ruehr, N.K., Buchmann, N., 2009. Soil respiration fluxes in a temperate mixed forest: seasonality and temperature sensitivities differ among microbial and root-rhizosphere respiration. *Tree Physiology*, 30: 165-176
- Rustad, L.E., Campbell, J.L., Marion, G.M., Norby, R.J., Mitchell, M.J., Hartley, A.E., Cornelissen, J.H.C., Gurevitch, J., 2001. A meta-analysis of the response of soil respiration, net nitrogen mineralization, and aboveground plant growth to experimental ecosystem warming. *Oecologia*, 126: 543–562
- Rustad, L.E., Campbell, J.L., Marion, G.M., Norby, R.J., Mitchell, M.J., Hartley, A.E., Cornelissen, J.H.C., Gurevitch, J., 2001. A meta-analysis of the response of soil respiration, net nitrogen mineralization, and aboveground plant growth to experimental ecosystem warming. *Oecologia*, 126 (4): 543–562
- Ryan, M. G., Law, B. E., 2005. Interpreting, measuring, and modeling soil respiration. *Biogeochemistry*, 73: 3–27
- Saiz, G., Byrne, K.A., Butterbach-Bahl, K., Kiese, R., Blujdea, V., Farrell, E.P., 2006. Stand age-related effects on soil respiration in a first rotation Sitka spruce chronosequence in central Ireland. *Global Change Biology*, 12 (6): 1007-1020
- Schlesinger, W.H., Andrews, J.A., 2000. Soil respiration and the global carbon cycle. *Biogeochemistry*, 48: 7–20
- Schlesinger, W.H., Bernhardt, E.S., 2013. *Biogeochemistry: An analysis of global change*. 3rd edition. Elsevier. 688
- Sulzman, E.W., Brant, J.B., Bowden, R.D., Lajtha, K., 2005. Contribution of aboveground litter, belowground litter, and rhizosphere respiration to total soil CO<sub>2</sub> efflux in an old growth coniferous forest. *Biogeochemistry*, 73: 231-256
- Varik, M., Kukumägi, M., Aosaar, J., Becker, H., Ostonen, I., Lõhmus, K., Uri, V., 2015. Carbon budgets in fertile silver birch (*Betula pendula* Roth) chronosequence stands. *Ecological Engineering* 77: 284–296
- Wang, C., Ma, Y., Trogisch, S., Huang, Y., Geng, Y., Scherer-Lorenzen, M., He, J-S., 2017. Soil respiration is driven by fine root biomass along a forest chronosequence in subtropical China. *Journal of Plant Ecology*, 10: 36–46
- Wei, W., Weile, C., Shaopeng, W., 2010. Forest soil respiration and its heterotrophic and autotrophic components: Global patterns and responses to temperature and precipitation. *Soil Biology and Biochemistry* 42: 1236-1244
- Wiseman, P.E., Seiler, J.R., 2001. Soil CO<sub>2</sub> efflux across four age classes of plantation loblolly pine (*Pinus taeda* L.) on the Virginia Piedmont. *Forest Ecology Management*, 192: 297-311
- Xu, M., Qi, T., 2001. Soil-surface CO<sub>2</sub> efflux and its spatial and temporal variations in a young ponderosa pine plantation in northern California. *Global Change Biology*, 7: 667-677

## Lihtlitsents lõputöö elektroonseks avaldamiseks

Mina, Inge-Marit Tigas,

annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Tõravere metsaseireala mullahingamine ja peenjuurte biomass“, mille juhendaja on Kaie Kriiska,

- 1.1.reprodutseerimiseks säilitamise ja üldsusele kättesaadavaks tegemise eesmärgil, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace-is lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
  - 1.2.üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tartu Ülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace'i kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.
2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
  3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Tartus **28.05.2018**